

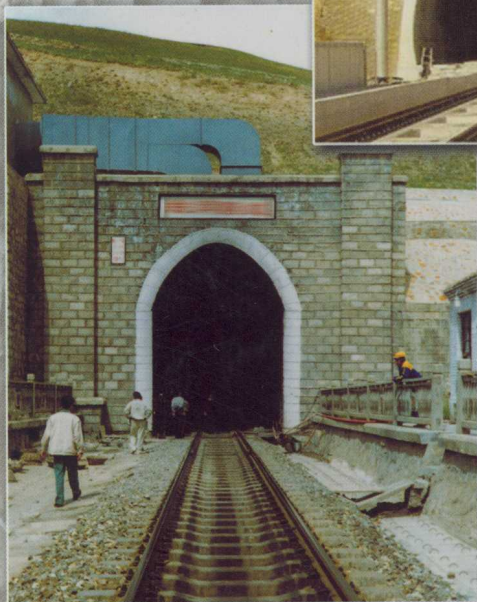


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

隧道工程

(第二版)

朱永全 宋玉香 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材

隧道工程

(第二版)

朱永全 宋玉香 主编

景诗庭 主审

中国铁道出版社

2007年·北京

ISBN 978-7-113-08330-0 / TU · 800
本：787 mm × 1 092 mm 1/16 印张：32.5 字数：260 千
次：2002年9月第1版 2007年8月第2版 2007年8月第4次印刷
编：北京市光明日报印刷厂
网 址：www.tdpress.com
社 址：北京市宣武区右安门内大街8号
社 址：北京市宣武区右安门内大街8号
社 址：北京市宣武区右安门内大街8号

内 容 简 介

本书全面介绍了铁路、公路隧道工程的勘测、构造、设计、施工及运营养护的系统知识。按照当前隧道建设事业的新发展,增加了高速铁路、高速公路隧道构造,不良地质隧道施工,隧道运营养护,以及一些新技术、新方法和新工艺等相关内容。书中理论与实践并重,并结合工程实例介绍了各种理论和知识的应用。

本书为高等学校土木工程、交通工程等专业的教学用书,也可供研究生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道工程/朱永全主编. —2版. —北京:中国铁道出版社,2007.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-08226-0

I. 隧… II. 朱… III. 铁路隧道—隧道工程—高等学校—教材 IV. U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 125450 号

书 名: 隧道工程 (第二版)

作 者: 朱永全 宋玉香 主编

策划编辑: 李丽娟

责任编辑: 李丽娟 电话: 010-51873135

封面设计: 马 利

责任校对: 汤淑梅

责任印制: 金洪泽

出版发行: 中国铁道出版社

地 址: 北京市宣武区右安门西街 8 号

邮政编码: 100054

网 址: www.tdpress.com

电子信箱: 发行部 ywk@tdpress.com

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

总编办 zbb@tdpress.com

版 次: 2005 年 9 月第 1 版 2007 年 8 月第 2 版 2007 年 8 月第 4 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 22.5 字数: 560 千

书 号: ISBN 978-7-113-08226-0/TU·900

定 价: 36.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者发行部调换。

电 话: 市电 (010) 51873170 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504 路电 (021) 73187

第二版前言

石家庄铁道学院“隧道工程”课程授课已有 50 多年的历史,一直被列为学院主干课程。2000 年学院归属河北省后,为适应人才培养对象的调整和隧道工程建设新形势,学院系统开展了“隧道工程”课程建设。本课程 2003 年被评为河北省精品课程,2004 年被评为国家级精品课程。

本书作为国家级精品课的主干教材,借此次修订机会,除继续保持本书特色外,将章节内容适当调整,使读者能了解国内外隧道工程技术的新进展和国内隧道工程的新成果。高速铁路是铁路现代化的重要标志,我国今后将兴建大量高速铁路隧道。为此,本书修订时相应增加了高速铁路隧道相关的内容,如限界规定、断面设计、空气动力学效应及工程措施、长隧道防灾救援等等。20 世纪 80 年代以后意大利人提出了“隧道岩土控制变形分析工法”,这是继“新奥法”之后,对隧道工程设计和施工理念的又一新发展。它对软弱不稳定地层修建隧道有重大的指导意义。传入我国后,国人称之为“新意大利法”,本书用一节篇幅介绍其基本原理及实施要点。另外,隧道结构耐久性设计,TBM 导坑超前扩挖法等都是新增加的内容。由于隧道施工组织管理也是工程技术人员必须了解的知识,本书新加一节介绍相关基本内容。本书主要讲述山岭隧道的设计、施工、运营与养护,为节省篇幅,将原书中盾构、沉埋、顶进、连续墙等“其他施工方法”删去。

本教材理论与实践并重,经典理论、方法与现代新技术、新方法相结合,引导学生掌握理论知识,注重解决实际工程技术问题能力的培养。教材内容丰富,信息量大,知识结构系统。

本书由朱永全、宋玉香主编。本教材的编写人员都具有丰富的教学经验,参加编写的有朱永全(第一、八章)、宋玉香(第二、五章)、张素敏(第三章)、孙星亮(第四章)、刘勇(第六章、第七章第一~四节)、李宏建(第七章第五~八节)、贾晓云(第九章)、孙明磊(第十章)、刘志春(第十一章)、李文江(第十二章)。全书由朱永全负责统稿。

此次修订,特请 20 世纪 50 年代即已从事隧道课教学的景诗庭教授作为主审。在编写过程中,得到了赖涤泉教授,何本国、李现森、王利伟、孙元国等同志的支持和帮助,在此深表谢意。

本书修订过程中采纳吸收了《高速铁路隧道》、《隧道 ADECO-RS 工法》等书籍和著作成果,在此向各书编著者表示感谢。

由于时间仓促,水平有限,书中仍难免有不少错误和不足,恳请专家和读者批评指正。

编 者

二〇〇七年五月

第一版前言

本教材是在石家庄铁道学院本科教学培养方向调整的形势下,面对铁路、公路和市政等隧道工程建设人才培养的新需要,以我院编写的《隧道工程》(1995年版)和《铁路隧道设计》(1998年版)教材为基础,吸收了高速铁路、公路隧道建设新方法、新技术以及我院“隧道工程”建设新成果(2003年被评为河北省精品课程,2004年被评为国家级精品课程)改编而成的。在编写过程中参考了最新发布的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)。

本教材以铁路隧道、公路隧道为主,从隧道的概念、种类出发,介绍了交通类隧道的构造;阐述围岩工程特性、隧道支护、衬砌结构设计原理和方法;不仅介绍传统矿山法和现代新奥法的施工方法及工艺,还结合目前隧道工程建设的发展,介绍不良地质隧道施工、隧道掘进施工等新技术;也介绍了隧道施工必备的风、水、电等辅助施工作业以及隧道运营及养护。

本教材理论与实践并重,经典理论、方法与现代新技术、新方法相结合,引导学生掌握理论知识,注重解决实际工程技术问题能力的培养。教材内容丰富,信息量大,知识结构系统。

本教材的编写人员都具有丰富的教学经验,参加编写的有朱永全(第一、七章)、宋玉香(第二、五章)、张素敏(第三章)、孙星亮(第四章)、刘勇(第六章第一~八节)、李宏建(第六章第九~十一节)、李文江(第十一章)、贾晓云(第八章)、孙明磊(第九章)、刘志春(第十章)。本书由朱永全负责统稿和审定。

本书在编写过程中,得到了景诗庭教授的悉心指导,林宝龙、刘建海、丁祥、庞山、王利伟、李军省等同志给予了文字支持与校核,在此深表感谢。

由于水平有限,时间仓促,本书难免有错误和不足之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者
2005年6月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 隧道的概念及种类	1
第二节 隧道工程的历史及发展现状简况	4
第三节 大力推进中国隧道建设技术创新发展	11
思考题	12
第二章 隧道工程地质环境及围岩分级	13
第一节 隧道工程地质调查与勘测	13
第二节 施工地质超前预报	16
第三节 岩体的基本工程性质	19
第四节 围岩分级	26
思考题	32
第三章 隧道线路及断面设计	33
第一节 隧道位置的选择	33
第二节 隧道洞口位置的选择	37
第三节 隧道平、纵断面设计	40
第四节 隧道横断面设计	44
第五节 高速铁路隧道单洞双线和双洞单线方案选择	56
思考题	57
第四章 隧道结构构造	58
第一节 衬砌构造	58
第二节 洞门与明洞	65
第三节 附属建筑物	69
第四节 高速铁路隧道空气动力学问题及工程措施	78
思考题	83
第五章 隧道支护结构设计计算方法的基本原理	84
第一节 隧道设计计算理论的发展	84
第二节 围岩压力	87
第三节 结构力学方法	98

第四节 岩体力学方法	107
第五节 信息反馈方法及经验方法	127
第六节 隧道衬砌结构耐久性设计概要	131
思考题	133
第六章 隧道施工方法	135
第一节 隧道施工方法概述	135
第二节 主要开挖方法	136
第三节 新奥法的基本概念	141
第四节 隧道岩土控制变形分析工法简介	142
第五节 隧道洞口施工	149
思考题	151
第七章 隧道施工工艺及施工技术	152
第一节 围岩预支护(预加固)	152
第二节 隧道爆破施工技术	160
第三节 装渣与运输	184
第四节 初期支护	192
第五节 监控量测与数据分析	217
第六节 防排水施工工艺	234
第七节 二次衬砌	239
第八节 辅助坑道	243
思考题	248
第八章 不良地质隧道施工	249
第一节 概 述	249
第二节 富水断层破碎围岩	250
第三节 膨胀性和挤压性围岩	252
第四节 黄土地质	260
第五节 岩溶地质	261
第六节 高地应力硬岩(岩爆)地质	268
第七节 煤系地层	270
第八节 隧道施工坍方处理措施	273
思考题	275
第九章 隧道掘进机(TBM)施工	276
第一节 概 述	276
第二节 敞开式掘进机基本构造	280
第三节 掘 进	285
第四节 衬砌施工	288

第五节 不良地质地段施工.....	288
第六节 掘进机导坑超前扩挖法.....	290
思考题.....	294
第十章 施工辅助作业及施工组织.....	295
第一节 压缩空气供应.....	295
第二节 施工供水.....	298
第三节 供电及照明.....	300
第四节 通风与防尘.....	305
第五节 隧道工程施工组织.....	314
思考题.....	324
第十一章 隧道运营及养护.....	325
第一节 铁路隧道运营通风.....	325
第二节 公路隧道运营通风.....	329
第三节 隧道养护.....	334
思考题.....	337
第十二章 铁路隧道防灾救援.....	338
第一节 概 述.....	338
第二节 防灾救援技术现状.....	340
第三节 防灾救援设计.....	345
思考题.....	349
参考文献.....	350

第一章

绪 论

第一节 隧道的概念及种类

一、隧道的概念

隧道是埋置于地层中的工程建筑物,是人类利用地下空间的一种形式。1970 年国际经济合作与发展组织召开的隧道会议综合了各种因素,对隧道所下的定义为:“以某种用途、在地面下用任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面积大于 2 m^2 的洞室。”

二、隧道的分类

隧道的种类繁多,从不同的角度来区分,就有不同的分类方法。从隧道所处的地质条件来分,可以分为土质隧道和石质隧道;从埋置的深度来分,可以分为浅埋隧道和深埋隧道;从隧道所在的位置来分,可以分为山岭隧道、水底隧道和城市隧道。但分类比较明确的还是按照隧道的用途来划分,可以有以下几种。

(一)交通隧道

这是隧道中为数最多的一种,它们的作用是提供运输的地下通道。

1. 铁路隧道

我国是个多山国家,山地、丘陵、高原等山区面积约占全国面积的 $2/3$ 。铁路穿越这些地区时,往往会遇到山岭障碍。而铁路限坡平缓,常难上升到越岭所需要的高度,同时,铁路还有最小曲线半径限制,常限于山岳地形无法绕过,需要修建隧道以克服高程或平面障碍。在沿着河谷修建铁路时,遇到河道弯曲、两岸横坡陡峻、地质不良等现象,常修建隧道使线路从山里通过。隧道既可使线路顺直,线路缩短,又可以减小坡度,还可躲开各种不良地质条件,从而提高牵引定数,多拉快跑,使运营条件得以改善。所以,在山区铁路线上修建隧道的范例是很多的。川黔线上的凉风垭隧道,成昆线沙木拉达隧道,大秦线军都山隧道,西康线秦岭隧道,朔黄线长梁山隧道以及兰新复线乌鞘岭隧道等都是著名的越岭隧道,而成昆线的关村坝隧道,衡广复线大瑶山隧道等都是河谷地段截弯取直的良好范例。宝成线宝鸡至秦岭一段 45 km 线路上就设有 48 座隧道,蜿蜒盘旋于秦岭崇山峻岭之中。

高速铁路是铁路现代化的重要标志。国际上目前将列车最高运行速度不小于 200 km/h 的铁路称为高速铁路,我国把新建最高运行速度不小于 250 km/h 和改建既有线最高运行速度不小于 200 km/h 的铁路称为高速铁路。高速铁路行车速度高,对基础设施要求高,线路最小曲线半径较大,所以高速铁路上必然会出现大量的隧道工程。高速铁路隧道与一般铁路隧道相比有较多的不同,主要与列车空气动力学相关。高速行驶的列车前方的空气受到压缩,而列车后方的空气则形成一定负压,产生一系列复杂的空气动力学效应。高速铁路隧道设计涉及洞口形式、隧道及列车断面、隧道结构耐久性、洞内设施及轨道类型等一系列问题。

2. 公路隧道

公路的限制坡度和限制最小曲线半径都没有铁路那样严格,过去在山区修建公路时为节省工程造价,常常是宁愿绕行,也不愿修建费用昂贵的隧道。因此,过去公路隧道为数不多。但是,随着社会生产的发展,高速公路逐渐出现,它要求线路顺直、平缓、路面宽敞,于是在穿越山区时,也常采用隧道方案。此外,在城市附近,为避免平面交叉,利于高速行驶,也常采用隧道方式通过。目前,公路隧道逐渐多起来。

3. 水底隧道

当交通线需要横跨河道时,一般可以架桥或轮渡通过。但是,如果在城市区域以内,河道通航需要较高的净空,而桥梁两端引道常需占用宝贵的城市用地或修建结构复杂的很长的引桥,此时采用水底隧道,既不影响河道通航,也避免了风暴天气轮渡中断的情况,而且在战时不致暴露交通设施的目标,防护层厚,是国防上的较好选择。为横跨黄浦江,上海已修建了多座水底隧道,广州地铁穿越珠江、武汉地铁穿越长江都修建了水底隧道。

4. 地下铁道

地下铁道是解决大城市交通拥挤、车辆堵塞等问题,且能大量快速运送乘客的一种城市交通设施。它可以使很大一部分地面客流转入地下,可以高速行驶,且可缩短车次间隔时间,节省了乘车时间,便利了乘客的活动。在战时,还可以起到人防的功能。

5. 航运隧道

当运河需要越过分水岭时,克服高程障碍成为十分困难的问题,一般需要绕行很长的距离。如果层层设立船闸则建设投资很大,运转和维修的费用也很高,而且过往船只延误时间很多。如果修建航运隧道,把分水岭两边的河道沟通起来,则既可以缩短航程,又可以省掉船闸的费用,船只可迅速而顺直地驶过,航运条件大为改善。

6. 人行地道

城市闹市区行人众多,而且与车辆混行,偶有不慎便会发生交通事故。在横跨十字路口处,即使有指示灯和人行横道线,但快速的机动车也不得不频频减速,甚至要停车避让。为了提高交通运送能力及减少交通事故,除架设过街高架桥以外,也可以修建人行地道和地下立交车道。这样可以缓解地面交通的压力,也大大减少了交通事故。

(二) 水工隧道

水工隧道(也称为隧洞)是水利枢纽的一个重要组成部分,根据其用途又可分为如下几种。

1. 引水隧洞

它把水引入水电站的发电机组,产生动力资源。引水隧洞有的全部充水因而内壁承压,有的只是部分过水因而内部承受大气压力和部分水压,分别称之为有压隧洞和无压隧洞。

2. 尾水隧洞

它是发电机组的排水通道。

3. 导流隧洞或泄洪隧洞

它是水利工程中的一个重要组成部分,可起疏导水流或水库容量超限后的泄洪通道。

4. 排沙隧洞

它可用来冲刷水库中淤积的泥沙,把泥沙裹带送出水库。有时也用来放空水库里的水,以便进行库身检查或修理建筑物。

(三) 市政隧道

市政隧道是城市中为安置各种不同市政设施而修建的地下孔道。由于城市不断发展,工

商业日趋繁荣,人民生活水平逐步提高,对公用事业的要求也越来越高。许多城市不得不利用地下空间,把市政设施安置在地下,既可不占用地面面积,又不至扰乱高空位置和影响市容。按市政隧道的用途,可有如下几种分类。

1. 给水隧道

城市自来水管网遍布市区,必须有地下孔道来容纳安置这些管道,它既不占用地面,也可避免遭受人为的损坏。

2. 污水隧道

城市污水需要引入到污水处理厂以净化返用,条件不充分时仍有部分污水还要排放到城市以外。这都需要有地下的排污隧道。这种隧道可能是本身导流排送,此时隧道的形状多采用卵形;也可能是在孔道中安放排污管,由管道排污。一般排污隧道的进口处,多设有拦渣格栅,把漂浮的杂物拦在隧道之外,不致涌入造成堵塞。

3. 管路隧道

城市所供煤气、暖气、热水等,一般都是把管路放置在地下的孔道中。经过防漏及保温措施,把这些能源送到居民家中。

4. 线路隧道

城市中,输送电力的电缆以及通讯的电缆,都安置在地下孔道中。既可以保证不为人们的活动所损伤或破坏,又免得悬挂高空,有碍市容观瞻。这些地下孔道多半是沿着街道两侧敷设的。

实践中,也可将以上四种隧道合建成一个大隧道,称之为“共同沟”。

5. 人防隧道

为了战时的防空目的,城市中需要建造人防工程。在受到空袭威胁时,市民可以进入安全的庇护所。人防工程除应设有排水、通风、照明和通讯设备以外,在洞口处还需设置各种防爆装置,以阻止冲击波的侵入。同时,要做到多口联通、互相贯穿,在紧急时刻,可以随时找到出口。

(四) 矿山隧道

在矿山开采中,常设一些隧道(也称为巷道),从山体以外通向矿床。

1. 运输巷道

向山体开凿隧道通到矿床,并逐步开辟巷道,通往各个开采面。前者称为主巷道,是地下矿区的主要出入口和主要的运输干道。后者分布如树枝状,分向各个采掘面。此种巷道多用临时支撑,仅供作业人员进行开采工作的需要。

2. 给水巷道

送入清洁水为采掘机械使用,并将废水及积水通过泵抽,排出洞外。

3. 通风巷道

矿山地下巷道穿过许多地层,将会有多种地下气体涌入巷道中来,再加上采掘机械不断排出废气,还有工作人员呼出气体,使得巷道内空气变得污浊。如果地下气体含有瓦斯,在含量达到一定浓度后,将会发生危险,轻则致人窒息,重则引起爆炸。必须及时把有害气体排除出,因此需要设置通风巷道,用通风机把污浊空气抽出去,并把新鲜空气补进来。

第二节 隧道工程的历史及发展现状简况

一、隧道工程的历史

我国最早有文字记载的地下人工建筑物,出现在东周初期(约公元前七百年)。《左传》中有“……掘地及泉,隧而相见……”的记载。最早用于交通的隧道为“石门”隧道,位于今陕西省汉中县褒谷口内,建于东汉明帝永平九年(公元66年)。用作通道的还有安徽亳县城内的古地下道,建于宋末元初(约13世纪),是我国最早的城市地下道。

在其他古代文明地区有很多著名的古隧道,如公元前2180~2160年前后,在古巴比伦城幼发拉底河下修筑的人行隧道,是迄今已知最早用于交通的隧道,为砖砌构造物。古代最大的隧道建筑物可能是那不勒斯与普佐利(今意大利境内)之间的婆西里勃隧道,完成于公元前36年,至今仍可使用,它是在凝灰岩中凿成的垂直边墙无衬砌隧道。

约于公元7世纪,我国隋末唐初时的孙思邈在《丹经》一书中记载了黑火药的制法。1225年以后传入伊斯兰国家,13世纪后期传到欧洲,17世纪初(1627年),奥地利的工业家首先将火药用于开矿。1866年瑞典人诺贝尔发明黄色炸药达纳马特,为开凿坚硬岩石提供了条件。

近代隧道兴起于运河时代,从17世纪起,欧洲陆续修建了许多运河隧道。其中法国的马尔派司(Malpas)运河隧道,建于1678~1681年,长157m,它可能是最早用火药开凿的航运隧道。1820年以后,铁路成为新的运输手段,1827年在英国、1837年在法国先后开始修建铁路隧道。随着铁路运输事业的发展,隧道也越来越多,先从当时经济比较发达的欧洲各国开始,然后是美国 and 明治维新后的日本。我国第一条铁路隧道是1890年建成的台湾狮球岭隧道,1903年建成第一座长度超过3km的兴安岭隧道。1895~1906年已出现了长19.73km穿越阿尔卑斯山的最大铁路隧道。目前最长的铁路隧道已达53.85km。第一座用于现代交通的水底隧道是1807年开工的伦敦泰晤士河下公路隧道,施工过程中该隧道因水患而停工,1823年由法国工程师勃吕奈尔接手,历时18年用盾构完成。我国第一条水底公路隧道是1970年建成的上海黄浦江水底隧道。较为完善的水底道路隧道建成于1927年,位于纽约哈德逊河底的荷兰(Holland)隧道。19世纪初,欧洲的法、意、瑞士等国就已在山区修建公路隧道。2001年初投入运营的挪威西部的拉达尔隧道长24.5km,是目前世界最长的公路隧道。

隧道工程的施工条件极其恶劣,体力劳动强度和施工难度都相当大。为减轻劳动强度,人们一直在做不懈的努力。古代一直使用“火焚法”和铁锤钢钎等原始工具进行开挖,直到20世纪才开始采用钻爆作业,至今大约有一百多年的历史。在此期间发明了凿岩机,经过将近一个世纪的努力,发展成为今天的高效率大型多头摇臂钻机,工人们已经从繁重的体力劳动中解放出来。爆破技术也在不断发展,从早期的导火索、火雷管引爆,发展到电雷管毫秒引爆和导爆管非电雷管起爆等,为减少对围岩的扰动,已实现光面爆破、预裂爆破等。和钻爆开挖法完全不同的还有两种机械开挖法:一种是用于软土地层的盾构机,发明于1823年,经过一个半世纪的不断改进,已经从手工开挖式盾构,发展到半机械化乃至全机械化盾构,能广泛用于各种复杂的软土地层的掘进。另一种是用于中等和坚硬岩石地层的岩石隧道掘进机。1881~1883年隧道掘进机首次试掘成功。目前已经发展成断面(直径10m以上)的带有激光导向和随机支护装置的先进的掘进机,机械化程度大大提高,加上辅助的通风除尘装置,使工作环境得到很大改善。

二、隧道设计与计算理论的发展

修建隧道之前要进行设计。隧道设计包括隧道位置设计以及隧道支护结构和附属设施设计两大部分。

隧道位置设计包括选定隧道的穿山高程和洞口位置,确定隧道线路的平、纵剖面及横断面形状等。通常是按照铁路或公路的等级和运营要求,结合山岭地形和地质条件,通过技术和经济比较,在线路勘测设计中一并完成。较早时期,由于施工技术的限制,修建长隧道比较困难,所以越岭隧道位置常较高,隧道较短,两端展线也较长;沿河展线也只能修建若干短隧道,这都限制了道路的通过能力。高等级铁路和公路要求较小的限坡和较大的曲线半径,这要修建较长的隧道才能满足要求。诸多隧道施工技术相继采用,使修建长隧道更易实现,长隧道的兴建又使道路的运营条件更为改善。日本铁路上越线 20 世纪 20 年代修建的清水隧道长 9.7 km,铁路在两端都有展线才得以穿越山岭;60 年代修建了新清水隧道,越岭高程降低,隧道长达 13.4 km,两端仍有展线;到 70 年代修建上越新干线时,一举修成 22.22 km 的大清水隧道,两端展线都去掉了。过去沿河展线的铁路,为适应弯曲河道和沟谷切割陡峻的山坡地形,常修建一串串短而半径小的隧道。在以后的线路改造和新建铁路上,常用一条深入山体内部的长大隧道代替这些短隧道。这都代表了隧道线路设计的新趋势。过去常将每米隧道与每米路堑造价相等处定为洞门位置。由于隧道造价比路堑高许多,形成的高边坡、高仰坡、深路堑在运营中常出现大量病害。我国在 20 世纪 60 年代中即总结了这些教训,提出“早进晚出”的方针。隧道适当加长就可避免很多运营病害。这一方针为世界隧道设计提供了重要经验。

在地层中开挖出所需的坑道断面后,需要修建支护结构来防止地层坍塌或风化,并保持坑道的稳定和运营需要的安全净空。支护结构系统包括开挖后的临时支护和永久衬砌,它们功能有所不同,构造和材料也有所差别。根据运营需要还要在隧道中修建通风、排水、照明、安全避让、防灾等设施,这些都要预先设计出来。支护结构设计是隧道设计的重要组成部分,多年来,隧道支护系统设计经历了结构从单一到多样,计算由简到繁,从经验设计逐渐上升到理论分析等阶段,其特点可概括如下。

1. 支护系统的组成和类型随着经济建设的发展不断扩大和完善

1681 年修成的第一条航运隧道是在凝质岩中修成的,但是没有衬砌。经过十年的运营才加修衬砌以防止岩层风化掉块。以后随着修建隧道的地层范围不断扩大,人们认识到修建初期支护和永久衬砌是保证施工和运营期间安全的重要技术措施。山区隧道一般都修建整体式衬砌。在隧道洞口要修建洞门以防止边坡和仰坡坍塌,以后在运营中为防止边坡落石又出现了明洞。

施工期间的临时支护在 20 世纪中叶以前大量使用木支撑,导坑用梁、柱门架,扩大用扇形支撑,西方国家在 19 世纪中叶曾采用过铸铁支撑,将它和砌筑圬工砌块的拱架组合在一起,后来发觉它太笨重且不易随压力变化而调整,故未能代替木支撑。1919 年孔兹(Kunz)发明的槽钢和钢轨组合能随着断面形状和地压力的变化而进行调整。进一步的简化是将型钢弯成的拱架直接或通过楔子与地层紧密接触,主要承受地层压力,在美国甚至用钢拱架支撑到全隧打通才作衬砌。我国由于早年钢材缺乏,直到 20 世纪中叶仍用木支撑。喷锚支护出现于 20 世纪 50 年代前,新奥法(NATM)将喷锚支护的作用提高到一个新的理论高度,并迅速在各项地下工程中广泛采用。我国在 20 世纪 60 年代中期开始采用锚喷支护以后,逐渐取代了耗费大量木材的木支撑。日本在松散地层中用型钢拱加喷混凝土作为初期支护效果很好,我国也在 70

年代末开始用格栅或钢拱支撑加喷混凝土以提高支护的强度和刚度。随着不良地层施工技术的发展,小导管注浆等超前预支护和地层加固技术已广泛应用。意大利、日本等国把管棚、旋喷拱、预支护(预切槽)称作先进的预支护技术。管棚在我国已成功推广,旋喷拱已开始应用,预切槽正在研究试验。

作为永久性支护结构的衬砌,其类型也在不断发展,150年前的隧道多按照地层性质采用天然石块砌筑衬砌,边墙圬工砌筑与岩石紧密接触。也用过陶土砖作拱圈,超挖部分用石块填筑。有意思的是当混凝土在地面建筑中使用后,一些隧道工作者曾经反对采用模筑混凝土作衬砌,因为它凝固较慢,不能立即承受地层压力,所以宁可先作成混凝土砌块再砌筑衬砌。以后由于环状拱架特别是钢拱架的采用和混凝土工艺的改进,到现在模筑混凝土已经成为隧道衬砌的主要材料。在松软不稳定地层,素混凝土不能提供足够的抗弯强度时,才在衬砌中加钢筋,或将钢拱支撑灌注在混凝土中。“新奥法”推广以后,由喷锚初期支护加模筑混凝土内衬组成的复合衬砌大量采用。北欧国家多为花岗岩等坚硬地层,自稳性能较好,20世纪形成的“挪威法”只用喷锚作永久衬砌。为了增加喷层的抗弯强度,在喷混凝土中加入钢纤维或有机复合纤维等。

隧道断面形式早期几乎都是直墙加半圆形拱圈,经过一段时间使用以后,逐渐知道对于侧压力较大的软弱地层要作成曲墙。有底鼓的地层还要作仰拱。近30年来,对软地层衬砌工作状态认识逐渐加深,仰拱的作用日渐突出,在软弱地层多主张设计成环状封闭结构。拱轴线形状也经历了半圆、三心圆、多心圆及尖拱、平拱的改变,主要是适应不同的地层压力分布情况。隧道断面的大小也是随运输事业的发展和施工技术的提高而在增加,早期的铁路隧道多是单线,只在地层较好的石质隧道中才修双线。300多年前修成的第一条航运隧道宽6.9 m,高8.4 m,断面面积大于50 m²,但它是在坚固的凝灰岩中建成的。早期的航运隧道大都只提供单船航行。很长时期铁路隧道都以单线居多,双线次之。在山区需要将车站修到洞里时,出现三线隧道或四线隧道,后者则作成双线连拱式。公路隧道前期也多是双车道或三车道,高速铁路和高等级公路对隧道断面的要求也日渐增大。公路隧道常修成各自单向行车的两座单洞以增加车道数量,或将隧道修成双连拱大断面隧道,用中隔墙将上下行车道分开。高速铁路对净空要求更大,我国目前拟定对250 km/h高速铁路双线隧道的有效净空面积为92 m²,350 km/h高速铁路隧道有效净空面积为100 m²,在一些不良地质地层中最大开挖面积可达130~160 m²。

隧道洞口一般都要修建洞门以支撑隧道顶上的仰坡和两侧边坡。对于长大隧道的洞门更要加以适当艺术造型以求美观。较早出现的端墙式、翼墙式洞门现在仍在使用。为了适应洞口不同地形及地质条件,柱式、台阶式等洞门相继出现,特殊条件下还采用过斜交、半斜交、钢筋混凝土悬臂及连拱式洞门等。值得一提的是,一些公路隧道采用的顺着山坡地形斜截的环框式洞门,既朴素大方、简洁明快,又可尽量少挖动山坡,一些铁路隧道洞门设计也在仿效。

洞内附属建筑物,铁路早期只有排水沟和避车洞。电气化铁路长隧道中一定距离要修建下锚段衬砌。为提高通讯质量,洞内设电缆槽、无人增音站、信号继电器箱等。高等级公路隧道附属建筑物则更多,要求更高。通风、照明、排水设施都要配置完善,长隧道还要有防火、防灾和安全避让等设施。

2. 支护系统的设计计算理论随着对隧道作用机理认识的深化和岩土力学等学科的进展而不断发展

在一个多世纪以前,当各种地面土木工程的结构形式和尺寸都能通过详细的静力计算来

决定时,许多隧道建筑师大都认为隧道不需进行静力计算,甚至不适宜进行这种计算,而一般都宁愿依靠实际经验和已成的先进工程实例来作设计。这主要是认为隧道所受的外力变化太大,影响因素太多,实在难以正确估计。这种经验设计和工程类比方法,至今仍在沿用。20 世纪前半期,一些西方教科书和土木工程师手册还在引用石质隧道拱圈厚度大致等于其断面最大宽度的 $1/12$ 这一经验数据。早年的欧洲发达国家,如德国、意大利、法国等工程管理部门组织有经验的隧道建筑师制定出一些隧道衬砌标准断面,鼓励工程师根据经验和对具体工点隧道受力的估计来选用这些标准断面。由于标准断面有较大的适应性,往往采用较大的尺寸和很高的安全度。

在进行经验设计的同时,很多隧道建筑师和学者一直在研究对支护结构的受力分析,并且随着对地层认识的深化不断取得进展。早期的实践就认识到只有浅埋隧道才承受上部覆土重量,到一定深度后只承受比覆土重量小的“松动压力”,学者们先后提出了各种松动压力计算方法。19 世纪及以前隧道衬砌多由石料及砖砌成,尺寸都较大,当时把衬砌作为刚性块体组成的拱圈,破坏时形成三铰拱,用压力线假设进行设计。

19 世纪后期,衬砌材料大量采用混凝土后,衬砌具有较好的整体性,开始引用拱桥设计思路,把衬砌作为弹性连续拱用超静定结构力学方法计算内力。20 世纪 90 年代,德国人和英国人编写的隧道书上都还详细介绍求土压力、水压力和自重作用力的压力线方法,开始时还没有考虑地层对结构产生的弹性反力。

20 世纪初就有学者提出地层对衬砌变形有约束作用,从而存在弹性反力。由于弹性反力与形变有关,开始只能对分布情况作些假定。前苏联的学者于 20 世纪 30 年代先后提出曲墙式衬砌按半月形分布,直墙视作弹性地基梁和用局部变形和共同变形理论计算弹性反力的方法。不用假定反力分布图形而用弹性链杆表示抗力的方法至今还在使用。

20 世纪中叶新奥法提出并推广后,人们认识到支护结构与围岩是一个共同受力整体,连续介质力学计算理论也相应发展。研究的主要问题已不限于支护本身的强度和稳定,还要充分发挥围岩的“自持”作用。随着岩石力学研究广泛深入,弹塑性、黏弹塑性等岩土本构关系提出,引申了支护与围岩共同作用的视野。用连续力学解析法分析仅对圆形洞室弹塑性和黏弹塑性有解。地下结构用数值法分析则有很大发展,有限元分析已比较普及,边界元与有限元耦合合法也有不少成果,用于块体或碎块围岩的“块体理论”或离散元也已有程序。

由于监控量测技术的发展和该项要求日益受到重视,根据支护系统位移状况判别坑道稳定性的技术也有很大发展,继“允许相对位移”判别标准之后,“极限相对位移”也已用到我国铁路设计、施工规范中。用位移量测结果反演推算围岩各种物性指标和初始应力的反分析法近年来也已有一些实用程序。

3. 支护系统承载能力及安全度评定随着结构设计理论的发展而不断完善

隧道衬砌的工作状态相当于受到约束的拱圈,能和周围地层共同工作。它的承载能力与拱形结构受力破坏分析密切相关。早期衬砌多用砖、石材料,以后大量采用混凝土和钢筋混凝土,衬砌承载力分析必然引用砖、石和混凝土结构设计理论的诸多成果。衬砌承载能力的检算也和整个建筑设计理论的发展同步。

早期也是采用允许应力法,用压力线方法静力平衡求出衬砌各截面的内力后,要求截面上的最大应力不超过材料的允许应力。衬砌的稳定性则以最大横推力与最小横推力的比值来判断,由于压力线与实际常有差异,所设计的衬砌都很保守。

结构分析方法进展到了按破损阶段设计法,考虑材料的塑性性质以计算截面的承载能力。

衬砌截面按偏心受压构件处理,混凝土结构偏压构件承载能力计算方法被引用到衬砌设计中,只是将一些地下结构独有的因素考虑进去。前苏联 20 世纪中期的隧道衬砌设计规范,按大小偏心分别以“等效平均应力”和“力矩守恒”等关系计算衬砌截面破损时的内力。此法在我国沿用到 20 世纪 70 年代中期,此后我国的隧道工作者综合国内外的若干试验研究成果,将衬砌截面偏心受压承载能力统一成为一个计算公式,以偏心受压影响系数表达不同偏心矩对构件承载能力的影响。20 世纪 80 年代中期,美国土木工程师协会批准出版了《隧道衬砌设计指南》,该书附录中推荐了弯矩—轴力相互作用曲线,在作图时将承载能力降低,使其具有一定安全系数。通过此曲线可判定分析所得各截面弯矩、轴力组合是否安全。

概率极限状态可靠度设计在地面结构中成功地应用,早就引起各国隧道界的关注。我国 20 世纪 80 年代中期开始将可靠度方法引入隧道设计的研究。到 20 世纪 90 年代末,以“荷载—结构”模式为主体的整体式衬砌和浅埋、偏压、明洞等结构的可靠度设计方法已达实用程度。21 世纪初我国修订发布的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)已有“概率极限状态设计”一节。随着隧道建设投资的增大,对隧道使用期限和工程质量的要求也日益提高,隧道结构耐久性设计也已提到日程上来。

4. 随着计算技术的发展和现代化设计手段的应用,支护系统设计周期大大缩短,计算精度大大提高,设计内容更加全面

早期按刚性结构设计衬砌,在图纸上画出多边形及压力曲线,用比例尺量出偏心矩,其精度较低。

按弹性结构假定抗力分布或按弹性地基梁计算的超静定拱形结构,最少包括 3 个及以上未知数和相应方程组,计算尺难以满足闭合精度要求,采用机械式或电动式计算器(机)。断面轴线坐标也需正确计算,设计计算一个衬砌断面有时需要几天,若用链杆法则时间更长。

随着电子计算机的应用,线性代数及计算技术等数学工具的发展,隧道支护系统设计计算进入新的阶段。计算时间大大缩短,精度大大提高,考虑的因素也相应增加。目前,按“荷载—结构”模式用链杆法对衬砌进行矩阵分析已是轻而易举。支护系统有限元、边界元、离散元分析,弹塑性、黏弹塑性和几何、物理双非线性等模型的采用和通用程序相继编出,能在较短的时间计算出成果。各种反分析和重复百万次运算的随机分析也能在较短的时间完成。目前有关设计院已拥有各种隧道支护系统设计、计算、绘图连续完成的 CAD 软件及勘测、设计、施工图一体化的软件,支护系统设计已进入智能化设计阶段。

5. 由于地层情况十分复杂,人们对它的认识还不充分,支护系统的设计计算模型还处于以经验类比为主,其他几种模型共存的状况

多年的实践使很多隧道工作者认识到支护系统设计不能完全依赖计算,但对计算模型的研究一直没有停顿,并力图将各种计算模型用于实际设计中,支护衬砌系统的理论计算仍然受到重视。国际隧协(ITA)结构设计模型研究组于 1981 年提出的报告中归纳了四种类型,即以工程类比为依据的经验法;以测试为依据的实用法如收敛—约束法;作用—反作用模型;连续介质模型等目前都在采用。

最早出现的经验设计和工程类比法目前仍占重要地位,只是随着时间的推移,工程实践的大大增加,经验积累日益丰富全面,很多经验已上升为理论,作为实践的指南。类比的选用也日益科学细致。特别是我国在不良地质和特殊地层修建隧道和支护设计方面积累了宝贵经验,成为国际隧道建设技术宝库中的重要篇章。“荷载—结构”(作用—反作用)模型用了半个多世纪,至今仍是标准图和一般隧道设计的主要方法,关于深埋、浅埋、偏压等围岩压力的估算

也有很多成果。连续介质模型对原始应力状况和围岩物性指标的依赖程度更大,目前只在大型重点隧道设计中能取得详尽勘测试验资料时才得以采用或作为对比计算。“收敛—约束”模型对围岩与支护的共同作用具有理论指导意义,但在实际应用中还有不少难题,目前仅在量测数据很完善时才好使用。

三、我国隧道工程的发展现状

1. 交通隧道

目前我国铁路隧道在数量、总长度上已处于世界领先地位。据不完全统计,中国自1949年10月至2005年末的半个多世纪以来,共建成铁路隧道6 874座,总延长4 158 km,连同此前修建的664座,总延长156 km的铁路隧道,现中国铁路建成的隧道达7 538座,总延长4 314 km。其中,长度大于5 km的隧道有53座。2006年建的隧道有1 785座,总延长2 164 km,即将开工修建的高速铁路隧道约146座,长度约184 km,规划修建的客货共线铁路隧道长度约2 100 km,其中特长隧道约760 km。这一组组生机勃勃的数字,足以显示中国铁路隧道光辉的历程和美好的发展前景。

我国运营铁路隧道具有标志性的工程主要有大瑶山隧道、秦岭隧道、乌鞘岭隧道、风火山隧道和昆仑山隧道。大瑶山隧道位于京广铁路衡(阳)广(州)段,全长14 294 m,是中国目前已建成的最长双线电气化铁路隧道。秦岭Ⅰ、Ⅱ线铁路隧道是2座平行的单线隧道,位于西(安)康线上,全长18.456 km,是20世纪我国最长的铁路隧道。乌鞘岭隧道位于兰新铁路增建二线上,全长20 050 m,也是两座单线隧道。该隧道在软岩深埋复杂应力隧道的修建技术上取得突破。青藏铁路风火山隧道是目前世界上海拔最高的多年冻土隧道,昆仑山隧道是目前世界上最长的多年冻土隧道,全长1 686 m。

我国高速铁路隧道分布在东北、华北、华东、中南、东南沿海及中西部地区,所通过的地形及地质情况异常复杂,尤其是武广客运专线隧道通过岩溶地区,郑西、石太客运专线部分隧道通过黄土地区,有下穿高速公路和既有建筑物的隧道,有位于自然保护区的隧道,有穿越珠江狮子洋水域的水下隧道,有穿越浏阳河和长沙市区的浏阳河隧道,有下穿天津市的海河隧道,还有通过采空区的山岭隧道等。总之,建设环境和地质情况复杂。在建的石(家庄)太(原)客运专线上的太行山隧道全长27 839 m,设计行车速度250 km/h,即将开工的青藏线西宁—格尔木复线关角隧道全长32 km。

在我国,上海、北京、广州等城市都在加快地铁建设,已通车里程达500 km(含城铁)。目前共有20多个城市正在建设或规划建设地铁等城市轨道交通。北京计划到2015年全市轨道交通运营线路达19条561 km,形成“三环、四横、五纵、七放射”格局,上海“十五”期间要建200 km轨道交通,广州十年内新建200 km轨道交通。

上海黄浦江下已建成多条水底隧道将浦东浦西连接起来,广州的珠江、宁波的甬江下都已建成水底地铁和公路隧道。武汉过长江和厦门岛与大陆的水下通道都正在兴建之中。

我国公路隧道在20世纪80年代前,因公路等级较低,同时限于设计、施工及短期投资大等多种原因,很少设计长大隧道,且数量(总长度)上也不多,但改革开放以后,为了实现截弯、降坡、提速、提高运营安全及实现长期运营收益等,相继修建了一批长大公路隧道。近年来,随着我国高速公路建设的大规模展开和设计、施工总体水平的提高,公路隧道工程在总量、单体长度上有了突飞猛进的发展。截至2002年,我国公路隧道总数已达1 782座,总长度704 km。隧道单洞长度也越来越长,如正在施工中的福建美荪岭隧道全长5.3 km,湖南的雪峰山隧道